

Japanese Patent Laid-open No.6-222412

(54) [Title of the Invention]

Optical transmission apparatus

(57) [Abstract]

5 [Object]

It is an object of the present invention to expand the limit of data processing capability due to a non-linear effect in an optical transmission apparatus for carrying optical signals over a long distance by
10 wavelength division multiplexing.

[Structure]

An optical wave-guide amplifier for amplifying the signal level of an optical signal, reduced due to attenuation caused along a transmission wave-guide
15 while being transmitted in the transmission wave-guide is continuously scattered almost all over the total length of the transmission wave-guide.

US 5392377
2/21/95

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平6-222412

(43) 公開日 平成6年(1994)8月12日

(51) Int. Cl. ⁵	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
G 0 2 F	2/00	9316-2 K		
	1/35	5 0 1 9316-2 K		
H 0 1 S	3/07	8934-4 M		
	3/10	Z 8934-4 M		
		8523-5 K	H 0 4 B 9/00	Z
審査請求	未請求	請求項の数 1 4	F D	(全 1 0 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願平5-268354

(22) 出願日 平成5年(1993)9月29日

(31) 優先権主張番号 P4232877. 2

(32) 優先日 1992年9月30日

(33) 優先権主張国 ドイツ (DE)

(71) 出願人 390039413

シーメンス アクチエンゲゼルシャフト

SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT

ドイツ連邦共和国 ベルリン 及び ミュンヘン (番地なし)

(72) 発明者 フランツ アウラツヒアー

ドイツ連邦共和国 82065 パイエルブルン アイヒエンシゴトラーセ 26

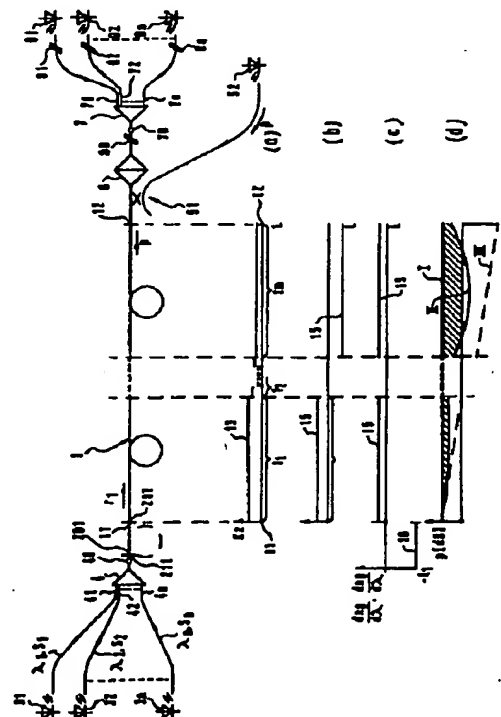
(74) 代理人 弁理士 富村 潔

(54) 【発明の名称】 光伝送装置

(57) 【要約】

【目的】 波長分割多重で光信号を長距離にわたり搬送する光伝送装置において、非線形効果により生じるデータ処理能力の限界をできるだけ拡大する。

【構成】 伝送導波路上を伝送され伝送導波路に沿った減衰により低下する光信号の信号レベルを増幅する光導波路増幅器が、連続的にほぼ伝送導波路の全長にわたり分散している。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 複数の隣接する光搬送波長 ($\lambda_1 \sim \lambda_n$) による波長分割多重で特に10km以上の距離にわたり光信号 ($S_1 \sim S_n$) を伝送する一つの伝送導波路 (1、2) を用いて光信号 ($S_1 \sim S_n$) を伝送する光伝送装置であって、伝送導波路 (1、2) がこの上を伝送され伝送導波路 (1、2) に沿って減衰により低下する光信号 ($S_1 \sim S_n$) の信号レベル (p) を増幅する光導波路増幅器を有するものにおいて、光導波路増幅器が連続的にほぼ伝送導波路 (1、2) の全長にわたり分散していることを特徴とする光伝送装置。

【請求項2】 伝送導波路 (1、2) がポンピング光線 (P) を用いた光ポンピングにより励起される伝送導波路 (1、2) 中での光増幅を達成するためにドーパントをドーパされた導波路から成り、この導波路へポンピング光線 (P) が入力されることを特徴とする請求項1記載の装置。

【請求項3】 ドーパントの濃度 (k_z) と伝送導波路 (1、2) へ入力されこの導波路 (1、2) 中を導かれるポンピング光線 (P) のポンピングパワー密度との積が、伝送導波路 (1、2) に沿ってほぼ一定であることを特徴とする請求項2記載の装置。

【請求項4】 ドーパントの濃度 (k_z) が伝送導波路 (1、2) 中を導かれる光信号 ($S_1 \sim S_n$) の伝送方向 (r_1 、 r_2) へ連続的な又は階段状の低下 (13、14) を有し、ポンピング光線 (P) がこの低下の範囲内でこの伝送方向 (r_1 、 r_2) に対し逆向きに伝送導波路 (1、2) 中を導かれることを特徴とする請求項3記載の装置。

【請求項5】 光信号 ($S_1 \sim S_n$) を導波路 (1) へ入力する伝送導波路 (1) の一方の端 (11) から、導波路 (1) に沿って、入力され導波路 (1) を通って導かれる光信号 ($S_1 \sim S_n$) を出力する導波路 (1) の反対側の端 (12) まで、ドーパントの濃度 (k_z) が連続的に又は階段状に低下し、ポンピング光線 (P) が光信号を出力する反対側の端 (12) を通って導波路 (1) へ入力され、導波路 (1) を通って光信号 ($S_1 \sim S_n$) を入力する一方の端 (11) へ導かれることを特徴とする請求項4記載の光信号 ($S_1 \sim S_n$) の一方向伝送装置。

【請求項6】 ドーパントの濃度 (k_z) が、光信号を入出力するファイバ (2) の一方の端 (21、22) から伝送導波路 (2) の中央 (L_2) まで連続的に又は階段状に増加し、中央 (L_2) から光信号 ($S_1 \sim S_n$) を入出力する反対側の端 (22、21) まで連続的に又は階段状に減少し、ポンピング光線 (P) が一方の端 (21、22) を介してばかりでなく反対側の端 (22、21) をも介して導波路 (2) へ入力され、相互に逆方向 (r_1 、 r_2) へファイバ (2) 中を導かれることを特徴とする請求項4記載の光信号 ($S_1 \sim S_n$) の

双方向伝送装置。

【請求項7】 伝送導波路がドーパントの濃度 (k_z) の階段状分布 (13、14) を有し、分布 (13、14) の各段に対して固有の導波路区画 ($1_1 \sim 1_m$) が設けられ、これらの区画中ではこの段に従属するドーパント濃度 (k_z) が一定であり、これらの導波路区画 ($1_1 \sim 1_m$) がドーパント濃度 (k_z) の階段状分布 (13、14) に応じて端面で相互に連結されていることを特徴とする請求項4ないし6の一つに記載の装置。

【請求項8】 ポンピング光線 (P) がほぼ伝送導波路 (1、2) の全長 (L) 上で横からこの導波路 (1、2) 中へ一定の又は局部的に変な結合度により入力されることを特徴とする請求項1ないし4の一つに記載の装置。

【請求項9】 ポンピング光線が、伝送導波路 (1、2) に沿って導かれこの導波路 (1、2) に光学的に結合されドーパされていない導波路中を導かれることを特徴とする請求項8記載の装置。

【請求項10】 伝送導波路 (1、2) 中のドーパントの濃度 (k_z) が一定であり、ドーパされていない導波路のドーパされた伝送導波路 (1、2) との結合は、ドーパされた伝送導波路 (1、2) へ入力されるポンピング光線のポンピングパワーがこのドーパされた導波路 (1、2) 中で一定であるように、このドーパされた導波路 (1、2) に沿って変化することを特徴とする請求項9記載の装置。

【請求項11】 光信号 ($S_1 \sim S_n$) を入力するファイバ (1、2) の一方の端 (11、12) には、伝送導波路 (1、2) の分散 ($d_{n0}/d\lambda$) に比べて逆の正負符号の分散 ($d_{n1}/d\lambda$) を有する補償導波路 (201、202) が前置接続され、その際伝送導波路 (1、2) の長さ (L) に比べて短い補償導波路 (201、202) の長さ (l_1 、 l_2) 及び補償導波路 (201、202) の逆の正負符号の分散 ($d_{n1}/d\lambda$) は、伝送導波路 (1、2) 及び補償導波路 (201、202) の分散の合計が伝送導波路 (1、2) の分散 ($d_{n0}/d\lambda$) より小さいように選ばれていることを特徴とする請求項1ないし10の一つに記載の装置。

【請求項12】 伝送導波路 (1、2) が一つの半部上で一つの正負符号の分散を有し、他の半部上で逆の正負符号の分散を有することを特徴とする請求項1ないし10の一つに記載の装置。

【請求項13】 伝送導波路 (1、2) が一つの光ファイバ又は一つの光ファイバの複数の区画から成ることを特徴とする請求項1ないし11の一つに記載の装置。

【請求項14】 光ヘテロダイン受信器と組み合わせ、装置により伝送される光信号 ($S_1 \sim S_n$) の受信のために用いることを特徴とする請求項1ないし13の一つに記載の装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】この発明は、複数の隣接する光搬送波長による波長分割多重で光信号を伝送する装置に関する。

【0002】

【従来の技術】光伝送線路では一般に、伝送線路の性能すなわち伝送の際のデータ処理能力を高める努力がなされている。

【0003】性能の良い導線依存形伝送線路のために特に光ガラスファイバが用いられる。光波長1.3 μm 及び1.55 μm (いわゆる光の窓)におけるこのファイバでの減衰の小さい領域は、全部で30000GHzを超える一つの伝送帯域幅に相応することが知られている。この帯域のできるだけ大きい部分を利用可能にする努力がなされている。

【0004】この種の伝送線路の性能を高めるために種々の方法が知られている。

【0005】データ処理能力はまずデータ信号の電気的又は光学的時分割多重によるデータ伝送速度の向上により高めることができる。その際一方では電子回路又は光電子回路中の制御可能なデータ伝送速度に関して限界が生じ、この限界は現在では最大で10ギガビット毎秒であり、将来はおそらく50～100ギガビット毎秒となり、他方では受信感度の低下又は分散に起因する走行時間効果の増加に基づきデータ伝送速度の増加と共に橋絡可能な距離が減少する。第1の限界は光増幅器の採用によりほぼ解消できるが、しかし第2の限界は回避することが難しい。改善は分散の少ない特殊なファイバの採用により達成することができる。伝送のために光ソリトンの使用 (例えばナカザワ (N. Nakazawa) らの論文「エルビウムをドープしたファイバ増幅器を用いる10ギガビット毎秒・1200kmの単一パス・ソリトンデータ伝送 (10Gbits/s-1200km single pass soliton data transmission using Erbium-doped fiber amplifiers)」、PD11、92年度光ファイバ会議、1992年2月2～7日、サンホゼ、カリフォルニア参照) が著しく有効であるが、しかしまた費用がかかる。ここでは分散効果がファイバ上の非線形効果により補償される。

【0006】データ処理能力に関する伝送線路の容量増加の好適な方法は、時分割多重技術に組み合わせた光学的多チャネル技術である。しかしこの技術の性能は特に伝送線路上の非線形効果に基づくチャネル間漏話により制限される。

【0007】光波長分割多重形の光多チャネル技術では、伝送すべき光信号が複数の隣接する光搬送波長上で伝送される。

【0008】しかしながらこの種の伝送装置の性能は複数のパラメータにより制限される。すなわち光の窓の利用可能な部分は特に光送信器の利用可能性又は同調範囲により制限される。最小のチャネル間隔又は搬送波長間

隔は、利用可能な光受信器の選択度 (例えばデマルチプレクサ又は直接受信の際の光フィルタの分解能、あるいはヘテロダイン受信の際の中間周波数フィルタ帯域幅)、変調された光データチャネルの帯域幅並びに伝送路上の非線形効果に基づくチャネル間漏話により決まる。

【0009】非線形効果に基づくチャネル間漏話はチャネル間隔が小さくかつチャネル数が多い場合に、特に高い送信出力を用いなければならないときに多チャネル装置における著しい制約となる。なぜならば大きい距離をチャネル当たり高いデータ伝送速度により橋絡しようとするからである。特に3波混合 (しばしば4波混合とも呼ばれる) 及びラマン散乱が多チャネル装置の場合の非線形相互作用を支配する。光ヘテロダイン受信を用いる伝送装置に与えるこの効果の影響の詳細な計算は、例えばクラブリフィー (Andrew R. Chraplyvi) の論文「光ファイバ非線形により課せられる光波通信上の制約 (Limitations on Lightwave Communications Imposed by Optical-Fiber Nonlinearities)」、ジャーナル オブ ライトウェーブ テクノロジー (J. Lightwave Techn.)、第8巻 (1990年)、第1548～1557ページに記載されている。

【0010】

【発明が解決しようとする課題】この発明の課題は、複数の隣接する光搬送波長による波長分割多重で光信号を特に40km以上の距離にわたり搬送するための光伝送装置を、非線形効果により生じるデータ処理能力に関する容量限界ができるだけ上方に移動させられるように最適化することにある。

【0011】

【課題を解決するための手段】この課題はこの発明に基づき、複数の隣接する光搬送波長による波長分割多重で特に10km以上の距離にわたり光信号を伝送する一つの伝送導波路を用いて光信号を伝送する光伝送装置であって、伝送導波路がこの上を伝送され伝送導波路に沿って減衰により低下する光信号の信号レベルを増幅する光導波路増幅器を有するものにおいて、光導波路増幅器が連続的にほぼ伝送導波路の全長にわたり分散していることにより解決される。

【0012】この発明に基づく装置を用いれば非線形効果による限界をほぼ回避できるので有利であり、それによりこの伝送装置の性能をできるかぎり向上することができる。

【0013】請求項1に記載のこの発明は下記の独自の考慮又は知見に基づいている。

【0014】すなわち伝送線路の受信側端部での光パワーは少なくとも受信器の感度に相応しなければならぬ。仮に理想的な損失のないかつノイズのない伝送媒体を利用できるならば、そのときは伝送線路の送信側端部上でも同様に小さいパワーで十分である。

【0015】非線形効果は伝送ファイバ中のパワーと共に著しく（例えば3波混合の場合には3乗で）増加するので、この低いパワーレベルではチャンネル数が多くかつ線路長が大きい場合でさえ、この効果に基づくチャンネル間漏話については何等の問題も生じないと予想される。しかしながら実際の場合にはガラスファイバは0.2 dB/km～0.5 dB/kmの減衰値を示すので、伝送線路が長い場合には送信器側端部上で線路へ入力すべき光パワーを相応に高くしなければならない。このことは、多数の狭く隣接したチャンネル又は搬送波長を有する多チャンネル装置及び大きい線路長の場合に非線形効果に基づく漏話を招くおそれがある。

【0016】チャンネル数が非常に多い場合に起こるようにラマン散乱が支配的であると、できるだけ均一に低いパワーレベルが線路全体に沿って達成されるようにファイバ線路を縦続接続しなければならない。これに反して3波混合が最も多くチャンネル漏話に関与するならば

（「ジャーナル オブ ライトウェーブ テクノロジー (J. Lightwave Techn.)」、第8巻（1990年）、第1548～1557ページによれば約300のチャンネル数まで）、そのときは妨げとなる非線形効果を比較的高い分散を有するファイバを用いることにより小さく保つことができる。その際伝送線路は非線形妨害に関して有効相互作用長 L_{eff} （「ジャーナル オブ ライトウェーブ テクノロジー (J. Lightwave Techn.)」、第8巻（1990年）、第1548～1557ページにおいては符号 L を付けられている）の2ないし3倍の長さを有するにすぎないかのように振る舞い、有効相互作用長 L_{eff} はファイバ分散の増加と共に小さくなり一般に8～17 kmである。

【0017】従って複数の隣接する光搬送波長による波長分割多重で光信号を伝送する伝送線路は、パワーレベルが強い非線形相互作用を有する範囲内でできるだけ低くなるか又は相互作用長自体が最小となるように最適化すべきであり、他方では線路の全減衰を光増幅により低減しなければならない。

【0018】非線形効果の有効相互作用長 L_{eff} が伝送線路に比べて大きい場合に対しては（例えばファイバ分散が非常に小さい場合又はラマン散乱が支配的であるときには）、一番有利な解決策は弱くドープされたガラスファイバの形の伝送媒体であり、このガラスファイバは伝送線路に沿って伝送される光信号レベルができる限り一定のままであるか、又は少なくともポンピングされないファイバに比べて緩和された低下を有するように、光によりポンピングされるということが認識されている。

【0019】この一般的な解決構想の具体的な解決策は請求項1に記載の伝送装置である。請求項2はこの装置の有利な実施態様に関する。

【0020】請求項2に記載の発明の望ましくかつ有利な形態は請求項3に記載され、この形態について請求項

4に有利な構成が記載されている。請求項4に記載の装置の場合には伝送導波路に沿ったできるだけ一定な低い信号パワーに対する要求が少なくとも第1近似で、ポンピング光線が分布低下の方向に対し逆向きにファイバ中で導かれることにより達成可能である。それにより導波路に沿ってファイバ減衰のゆえに小さくなるポンピング光線のパワーに基づき、光増幅の低下がドーパントの濃度の相応の増加により相殺されるか又は緩和され、それにより光増幅が導波路に沿ってほぼ一定にとどまるか、又は少なくともポンピングされない導波路に比べて緩和された低下を有することが達成できる。このことは光信号の信号レベルが導波路に沿って一定にとどまるか、又は少なくともポンピングされない導波路に比べて緩和された低下を有するということをもたらす。

【0021】一方向の伝送に対して有利な装置が請求項5に記載されている。

【0022】請求項4に記載の装置は、ポンピング光線が請求項5に記載の実施態様の場合とは異なり導波路の一方の端ではなく他の点で、例えば導波路の長手軸線の中央で入力されるような構成を含む。ポンピングパワーがファイバの中央へ入力されるならば、入力されたポンピングパワーが中央から相互に逆方向へ導波路の中で伝搬するのが合目的である。この場合には導波路各半部中のドーパント濃度の分布が導波路の中央へ向かう低下を有するのが合目的である。ポンピング光線のこの種の入力及びドーパント濃度のこの種の分布を有する導波路は双方向へ駆動される伝送線路に対しても適しており、その際この分布は合目的的にはファイバの中央に関して鏡面对称とすべきである。

【0023】双方向駆動される伝送線路に適しポンピング光線を端面で入力する装置が請求項6に記載され、その際ここでも一般に双方向伝送の場合と同様に、ドーパントの濃度分布が導波路の中央に関し対称であるのが合目的である。

【0024】とりわけ製造技術上の理由から、ドーパント濃度の段階状分布を用い各段に対してドーパントの一定の濃度を有する固有の導波路区画を用いるのが有利であり、その際導波路区画望ましくはファイバ区画が導波路全体の形成のために相互に連結される。請求項7にはこの種の導波路が記載されている。

【0025】この発明に基づく装置の望ましくかつ有利な種々の実施態様は請求項8ないし10に記載されている。

【0026】この発明に基づく装置の場合に3波混合が目立つか又は支配的ならば、3波混合を最小にするために分散の比較的大きい伝送導波路を比較的小さい補償導波路と組み合わせる用いることが合目的である（請求項11参照）。この種の補償導波路特に補償光ファイバにより伝送線路の分散の合計を十分に低く保ち、他方では3波混合に対する有効相互作用長を小さく保つために

は、伝送導波路自体ができるだけ高い分散を有するべきである。

【0027】注記すれば、光増幅器として働かない従来のドーブされていない導波路の場合に分散を補償するためにこの種の補償導波路を前置接続することは、既にプール(C.D. Pool)らの論文「2モードファイバ中の高次の空間的モードを用いる広帯域分散補償(Broadband Dispersion Compensation Using Higher-order Spatial-mode in a Two-mode Fiber)」, PD13、92年度光ファイバ会議、1992年2月2~7日、サンホゼ、カリフォルニア、から知られている。

【0028】3波混合が目立つか又は支配的である場合には、この発明に基づき請求項12に記載のような光導波路を用いることもできる。請求項12に記載の手段によりすなわち大きいが逆方向の分散を有する二つの光導波路の相互接続により、有効相互作用長 L_{eff} 及び伝送導波路の分散の合計を許容される小さい限界内に保つことができる。

【0029】請求項13に記載のように光ファイバ又はファイバ区画を光導波路として用いるのが有利である。

【0030】この発明に基づく装置は光ヘテロダイン受信器と組み合わせて用いられるのが有利である(請求項14参照)。

【0031】

【実施例】次にこの発明に基づく光伝送装置の複数の実施例を示す図面により、この発明を詳細に説明する。

【0032】図1に示す一方向駆動の伝送装置の場合には、 n 個(n は任意の自然数)の別々の光送信器31、32~3 n により異なるチャネル又は搬送波長 $\lambda_1 \sim \lambda_n$ 上に発生させられた光信号 $S_1 \sim S_n$ が並列に光結合器4の n 個の入力端41、42~4 n へ供給され、光結合器4がこれらの信号 $S_1 \sim S_n$ を唯一の出力端40上に集める。この出力端40は直接に又は図示のように3波混合を最小にするために中間接続された後述の補償ファイバ201を介して、これらの信号 $S_1 \sim S_n$ を入力するためにファイバ1の入力端11と結合することができる。

【0033】このファイバ1中でのパワーレベルを小さく保ち、また他方では例えば10~50GHzのチャネル間隔又は搬送波長間隔を有し得る限り多くの狭く隣接したチャネル又は搬送波長 $\lambda_1 \sim \lambda_n$ を伝送すべきであるので、信号 $S_1 \sim S_n$ の入力のためには例えば一つの出力端だけが利用される星形結合器の形の簡単な波長に無関係な光結合器4で十分である。この種の星形結合器の挿入損失は原理的には少なくとも $L \cdot dB = 10 \cdot \lg n$ である。

【0034】ファイバ1を通して伝送方向 r_1 へ伝送される光信号 $S_1 \sim S_n$ はこのファイバ1の反対側の出力端12でこれらの信号 $S_1 \sim S_n$ の出力のために出力されて光分波器7へ供給される。光分波器7は出力信号 S

$1 \sim S_n$ を n 個の別々の光受信器91、92~9 n へ供給する。この分波器7は一つの入力端70及び n 個の出力端71、72~7 n を有し、各出力端はそれぞれ従属する光受信器91、92~9 n と結合されている。

【0035】光分波器7として非波長選択形パワー分配器が用いられるならば、一方ではこのパワー分配器の各出力端71、72~7 n とこの出力端に従属する光受信器91、92~9 n との間に、この受信器91、92~9 n に従属する当該搬送波長 $\lambda_1 \sim \lambda_n$ の光信号 $S_1 \sim S_n$ に対しては透明であるが他の搬送波長の光信号に対しては透明でない従属する光フィルタ81、82~8 n を配置すべきである。他方ではこのパワー分配器7の場合にも少なくとも $L \cdot dB = 10 \cdot \lg n$ の挿入損失が生じるので、この損失を補助の光増幅器6により補償すべきであり、光増幅器6はファイバ1の出力端12とパワー分配器7との間に配置されるのが有利である。

【0036】ファイバ1の出力端12と分波器7との間に例えば増幅器6とパワー分配器7との間に、光信号 $S_1 \sim S_n$ を伝送する波長領域に対してだけ透明である補助フィルタ80を配置することが更に合目的的である。それによりこの波長領域外の妨げとなる波長を抑制することができる。

【0037】ガラスファイバの形のファイバは、ポンピング光線Pを用いたポンピングにより光の増幅をファイバ1中で励起できるドーパントをこの発明に基づき僅かにドーブされている。ドーパントとしては伝送波長が1.5 μm の波長窓内に存在するときには例えばエルビウム(Er)が適しており、1.3 μm の波長窓が利用されるときにはプラセオジム(Pr)が適している。

【0038】ポンピング光線Pはポンピングのためにドーブされたファイバ1に入力されこのファイバ1中を導かれる。その際ファイバ1中での光増幅の度合いを決定するファイバ1中のドーパント濃度 k_z は、ファイバ1へ入力される光信号 $S_1 \sim S_n$ の信号レベル p が伝送方向 r_1 へポンピングされたファイバ1を通過する際に、一定にとどまるか又は少なくともポンピングされず従って光を増幅するように働かないファイバ1に比べて緩和されたこの信号レベル p の低下を有するような分布13を、このファイバ1の長さ L にわたり有することが重要である。この措置によりとりわけ、チャネル数 n が多かつ線路長が大きいすなわちファイバ1の長さ L が大きい場合でさえ、非線形効果に基づくチャネル間漏話についての問題が生じないことが期待できるほどに、光信号 $S_1 \sim S_n$ を入力するファイバ1の入力端11での信号レベル p が小さく保たれるということを達成できる。

【0039】この目的に適したドーパントの濃度 k_z の分布13は、ファイバ1中を導かれる光信号 $S_1 \sim S_n$ の伝送方向 r_1 へ連続的な又は階段状の低下を有する分布であり、その際低下がファイバ1中のポンピング光線の伝送方向に対し逆向きに行われる。

【0040】図1に示す実施例の場合には(a)に示すように、光信号 $S_1 \sim S_n$ を入力するファイバ1の入力端11から伝送方向 r_1 へ階段状に減少する階段状分布13が存在する。

【0041】図1の(a)に示すようにファイバ1の入力端11に隣接するファイバ区画1₁、中のドーパントの濃度 k_z が最大であり、連続する各区画1₁、1₂・・・中で区画ごとに階段状に低下し、遂に濃度は光信号 $S_1 \sim S_n$ を出力するファイバ1の出力端12に隣接する最後の区画1_m。(mは選択可能な自然数)では最小値に到達する。

【0042】これらのファイバ区画1₁～1_mのそれぞれの中ではドーパントの濃度 k_z が一定に選ばれるのが合目的であり、端面で相互に結合された個々のファイバ区画1₁～1_mからファイバ1を集成するのがとりわけ製造技術上有利である。

【0043】ドーパントの濃度 k_z が小さい場合には、ポンピング光線がなおファイバ1の減衰の著しい緩和をもたらすところに、ドーパされたファイバ区画を組み込むことが有意義であるにすぎない。

【0044】ドーパントとして Er^{3+} を使用する場合には、増幅性ファイバ1の最適な Er^{3+} ドーピングが複数のパラメータに関係する。 Er^{3+} 濃度が与えられた場合にポンピング波長、半径方向屈折率分布、 Er^{3+} ドーピングの半径方向分布、ポンピングパワー並びに例えば複合ドーピングのファイバの化学的組成になお若干関係する最適なファイバ長さが存在する。しかしながら与えられたファイバ設計に対してはファイバの最適な長さ L と Er^{3+} 濃度との積がほぼ一定である。デジルビル(Emmanuel Desurvire)らの論文「有効なエルビウムをドーパされたファイバ増幅器のための設計最適化(Design Optimization for Efficient Erbium-Doped Fiber Amplifiers)」、ジャーナル オブ ライトウェーブ テクノロジー(Journal of Lightwave Technology)、第8巻、第11号、1990年11月、第170ページによれば、最適な長さ L と Er^{3+} 濃度との積に対する一般的な値は $1 \text{ km} \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ないし $1 \text{ km} \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ である。このことは例えば100 kmのポンピングされたファイバ線路の場合に、 Er^{3+} 濃度は $10^{15} / \text{cm}^3$ ないし $10^{16} / \text{cm}^3$ の範囲内に存在すべきであるということの意味する。この発明の枠内では特に例えば10～100 kmの比較的長いファイバ線路が問題となるので、ファイバ線路上でのポンピング光線の減衰をできるだけ小さく保つために $\gamma = 1$ 、4.7 μm の長いポンピング波長を選ぶべきである。

【0045】ポンピング光線Pは図1の(a)に示す分布13の場合に光信号 $S_1 \sim S_n$ を出力するファイバ1の出力端12からファイバ1中へ入力され、伝送方向とは逆方向へ信号 $S_1 \sim S_n$ を入力するファイバ1の入力端11へ向かう方向へファイバを通過する。

【0046】ポンピング光線Pの入力はすべての他の場合と同様に図1に示すファイバ1の場合にも光方向性結合器により、例えばファイバ1の出力端12と光増幅器6との間に配置された方向性結合器51により行うことができる。方向性結合器51はポンピング用レーザ52により発生させられたポンピング光線Pをファイバ1へ入力する。

【0047】ドーパントによるファイバ1のドーピングが均一な場合には、ポンピング光線Pのポンピングパワーがファイバ1の減衰に基づきファイバの出力端12から入力端11へ向かう方向へ低下するので、光増幅もこの方向へ低下する。しかし実際にはドーパントの濃度 k_z はこの方向へ増加するので、この方向における光増幅の低下は増加へ変換されるか又は補償されるか又は少なくとも弱められ、このことはこの発明にとって望ましい。

【0048】図1の(d)では曲線Iは入力された信号 $S_1 \sim S_n$ の信号レベル p が、ドーパントの濃度 k_z の適当に選ばれた分布13に基づきファイバ1を通過する際に一定に保たれるような理想的な状態を示す。曲線IIは信号レベル p が理想から外れて選ばれた分布13に基づきファイバ1を通過する際に確かに低下するが、しかし曲線IIIにより示されたポンピングされず従って増幅するように働かないファイバ1の場合ほどは激しくはない。

【0049】約300のチャネル数又は搬送波数 n までは制約的作用として支配的である3波混合の補償のために、ファイバ1の分散 $d n_0 / d \lambda$ (n_0 はファイバの屈折率であり、 λ は光の波長を意味する)の図1の

(b)に示された最適な分布15を用いることができる。この分布15は、光信号 $S_1 \sim S_n$ を入力するファイバ1の入力端11に隣接しファイバ1の約半部長 $L/2$ であるファイバ1の端区画において、分散 $d n_0 / d \lambda$ の高い値を有する。ファイバ1の残りの部分では分散 $d n_0 / d \lambda$ を同様に高くすべきであるが、しかし信号ひずみに関する分散効果(走行時間分散)を小さく保つために逆の正負符号を有する。

【0050】このファイバ1の入力端11に又は両端に、ファイバ1の分散 $d n_0 / d \lambda$ に比べて逆の正負符号、例えば図1の(c)の場合には負の符号の非常に高い分散 $d n_1 / d \lambda$ を有する補償ファイバ201が前置接続されるときは、図1の(b)に示すファイバ1の代わりに、このファイバの全長 L にわたり一定でありかつできるだけ高い分散 $d n_0 / d \lambda$ 、すなわちこの分散の一定の分布15を有するファイバを用いることができるので有利である。

【0051】ファイバ1の長さ L に比べて短い補償ファイバ201の長さ l_1 、及び結合器4の出力端40のそばの光信号 $S_1 \sim S_n$ を入力する入力端211及びファイバ1の入力端11のそばのこれらの信号 $S_1 \sim S_n$ を

出力する出力端 212 と結合されたこの補償ファイバ 201 の分散 $d n_1 / d \lambda$ の量 $|d n_1 / d \lambda|$ は、ファイバ 1 及び補償ファイバ 201 の分散の合計がファイバ 1 の分散 $d n_0 / d \lambda$ より小さい、望ましくはゼロに等しいように選ばれている。

【0052】図 2 に示された双方向の伝送装置は、ドーパントの濃度 k_z の線路に関し対称な別の分布を有するファイバ 2 において、かつ光信号 $S_1 \sim S_n$ ばかりでなくポンピング光線 P もファイバ 2 の両端 21、22 へ入

力され、信号 $S_1 \sim S_n$ がこれらの両端 21、22 から受信されることにより、図 1 に示す伝送装置とは異なっ

ている。このために図 1 に示す装置に比べて下記のものすなわち、
 — n 個の搬送波長 $\lambda_1 \sim \lambda_n$ で光信号 $S_1 \sim S_n$ を発生させる n 個の補助の別々の光送信器 31' ~ 3n'、
 — 信号 $S_1 \sim S_n$ が供給される n 個の入力端 41'、42' ~ 4n' と、これらの信号 $S_1 \sim S_n$ が集められ補助の方向性結合器 60 及び例えば補助の補償ファイバ 202 を介して図 1 のファイバ 1 の出力端 12 に相応するファイバ 2 の出力端 22 と結合された出力端 40' とを備える補助の光結合器 4'、

— 別の補助の光結合器 60' 及び例えば補償ファイバ 201 を介して、図 1 のファイバ 1 の入力端 11 に相応するファイバ 2 の入力端 21 と結合された補助の光増幅器 6'、

— 補助の光フィルタ 80' を通って補助の光増幅器 6' に結合された入力端 70' と、それぞれ固有の補助の光フィルタ 81' ~ 8n' を介して各一つの従属する光受信器 91' ~ 9n' と結合された n 個の出力端 71'、72' ~ 7n' を備える補助の光分波器 7'、及び

— 例えば補助のポンピングレーザ 52' により発生させられたポンピング光線 P を、図 1 のファイバ 1 の入力端 11 に相応するファイバ 2 の入力端 21 を通って入力する別の補助の光方向性結合器 51' が追加して設けられる。

【0053】図 2 のダッシュを付けた符号を備える各部分は、数値的に同じであるがしかしダッシュを付けられていない符号を備えた前記部分と同じ機能を有する。入力端 222 をファイバ 2 の出力端 22 に結合され出力端 221 では方向性結合器 51、60 と結合された補助の補償ファイバ 202 は、同様に機能及び構造において補償ファイバ 201 と同じである。

【0054】図 2 に示す双方向に駆動される伝送装置の場合には、光増幅が十分な場合に結合箇所又はファイバ端で発生する反射によって装置全体がレーザとして振動を開始することさえも招くという問題が発生するおそれのあることに注意すべきである。それゆえにこの種の箇所では例えば端面のコーティング、浸漬及び／又は斜め研磨により達成可能な低い光反射に留意しなければなら

ない。加えるにファイバ 2 の両側の望ましくはレーザ送信器から成る光送信器を光アイソレータ 100、100' 又はサーキュレータにより減結合するのが有利である。

【0055】フィルタ 80、80' により、自然発生的な放射に基づき光増幅器 6、6' 並びに増幅性ファイバ 2 から生じるノイズを制限することができる。

【0056】ファイバ 2 自体は図 2 の (a) に示すドーパントの濃度 k_z の分布 13、14 を有する。この分布 13、14 に従いドーパントの濃度 k_z はファイバ 2 の入力端 21 からファイバ 2 の中央 L_2 まで階段状に増加し、そしてその中央 L_2 から出力端 22 まで階段状に減少する。

【0057】3 波混合の影響を最小にするためにファイバ 2 はできるだけ高い分散、例えば図 2 の (b) に示す分布 15 による分散を有するべきである。

【0058】図 2 の (c) はファイバ 2 又は補償ファイバ 201、202 の分布 15、216、226 を定性的に示す。

【0059】図 2 の (d) では曲線 IV が定性的に、双方向伝送の際にドーパントの濃度 k_z の分布が最適に選ばれた場合に達成可能であり伝送方向 r_1 、又は r_2 とは無関係な入力信号 $S_1 \sim S_n$ の信号レベル p の最も小さい低下を示す。曲線 V は図 2 の (a) に示す分布 13、14 により達成可能な信号レベル p の低下を示し、この低下は曲線 III により示されたポンピングされていない従って増幅性に働かないファイバ 2 の場合のように激しくはない。

【0060】図 3 は、伝送線路に沿ったガラスファイバのドーピングが一定であり、その代わりに複数の区画が別個に光によりポンピングされるような変形された装置を示す。図示のポンピング装置は対称な双方向伝送に対し最適に設計されている。なぜならば伝送装置全体が線路中央に関して対称に設計されているからである。

【0061】この発明に基づくファイバによりヘテロダイン受信器を備える伝送装置を実現できるので特に有利である。なぜならば比較的高い受信器感度が達成され、光増幅器のノイズが中間周波数フィルタにより制限され、かつ非常に狭いチャネル間隔を中間周波数フィルタの高い選択性に基づき達成できるからである。

【0062】この発明に基づく装置により、100 のチャネル又は搬送周波数をそれぞれ 2.5 又は 5 ギガビット毎秒のデータ伝送速度により少なくとも 100 ~ 200 km の距離にわたって伝送できる最適化された伝送装置が可能となる。特にこの発明に基づく装置により性能の良い長距離通話伝送線路及び海底ケーブルを実現することができる。

【0063】要約すれば以上で非常に高いデータ処理能力を可能にする伝送装置を説明した。この伝送装置の中心部分は第 1 に伝送線路に沿ってできるだけ一定の低い

信号レベルを可能にする装置であり、第2に3波混合に対する有効相互作用長をできるだけ小さく保つ装置である。

【0064】できるだけ一定なパワーレベルに対する要求は、例えばErをドープしたファイバ増幅器の形の光増幅器によるファイバ線路の減衰補償により達成することができる。通常の公知の装置ではこのために一般にそれぞれ例えば50～100 kmのファイバ線路の後ろに、信号レベルを回復するために光増幅器が挿入される。0.2～0.25 dB/kmの一般的なファイバ減衰の場合には、このことは常にこの線路区画上で10～25 dBの信号レベルの変動を招く。この発明に基づき線路の減衰補償は伝送ファイバ自体が増幅器の一部として構成されることにより達成される。このためにファイバは例えばErイオンにより弱くドープされかつ光によりポンピングされる。理想的な場合にはドーパントの濃度と伝送線路に沿った光のポンピングパワー密度との積は、増幅又は信号レベルが線路に沿って一定となるように選ぶべきである。

【0065】ポンピングパワーがファイバ線路の一端から例えば伝送線路の送信側から入力されると、ポンピングパワーはファイバの吸収に基づき線路に沿って低下する。従ってドーピングの濃度は同じ程度にポンピングパワーの伝搬方向に沿って、ポンピングパワーとドーピングとの積がどこでも一定であるように増さなければならない。

【0066】変形案として結合された二つの光導波路を備える伝送ファイバを用いることができる。その際光データ信号は第1にドープされた従って増幅性の導波路中で導かれ、光ポンピングパワーは第2のドープされていない導波路中で導かれ、伝送線路に沿った両導波路の結合は一定のポンピングパワーがデータ信号用の望ましくは一定にドーピングされた第1の導波路中で達成されるように変更される。

【0067】長さ方向に可変のドーピング及び二つの導波路の可変の結合を備えるガラスファイバの製造は技術的に厄介であるので、理想的な解決策はこの発明では、種々のしかし一定のドーピングを含む複数のファイバ区画が縦続接続されるか、又は同一のドーピングのファイバを備え連続する線路区画が異なった強さでポンピングされるといことにより近似される。

【0068】一つの伝送ファイバを介してデータ信号を双方向へ伝送する場合には、原理的にこの原理に基づく最適化は有効性が少ない。伝送線路が対称に駆動されるすなわち両伝送方向へデータ処理能力が等しい（データ伝送速度が等しくチャンネル数が等しい）ならば、ドーピ

ングの推移又はポンピングパワーの推移は線路中央に関して対称でなければならない。

【0069】3波混合に対する有効相互作用長の最小化は、少なくとも高い信号パワーレベルの範囲内で高い分散を有するファイバが用いられ、それにより非線形性により生じた波がもはや干渉性に重ならないことにより満たすことができる。他方では高い分散が伝送長が大きい場合にデータ信号の許容できない走行時間ひずみ従ってチャンネル当たり許容されるデータ伝送速度の著しい制限を招くので、伝送線路の分散の合計すなわちファイバ線路全体にわたっての分散の積分を十分に低く保たなければならない。このことは伝送線路の一部上では正の分散を有するファイバが用いられ、線路の残りの部分上では負の分散を有するファイバが用いられ、それにより線路の分散の合計が十分に低くなることにより達成できる。分散のこの補償は非常に高い逆の分散を有し固有の伝送ファイバに前置又は後置接続された比較的短いファイバによっても達成することができる。

【0070】伝送線路ができるだけ一定のパワーレベルに対する要求に関して完全には最適化されておらず、そのためパワーレベルが伝送線路に沿って激しく変動するときには、少なくとも高い信号パワーレベルを有する線路区画上では高い分散を有するファイバが用いられるように配慮すべきである。

【0071】補助的な改善が光ヘテロダイン受信の採用により可能になる。この受信方法により達成可能な一般に10 dBの感度増加は、伝送線路上のパワーレベルを更に下げ従って非線形効果を更に低減するために利用することができる。また受信器の中間周波数部分での分散効果を、相応の逆向きの分散により電子的に補償することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】この発明に基づく光伝送装置の一実施例の回路図及び線図。

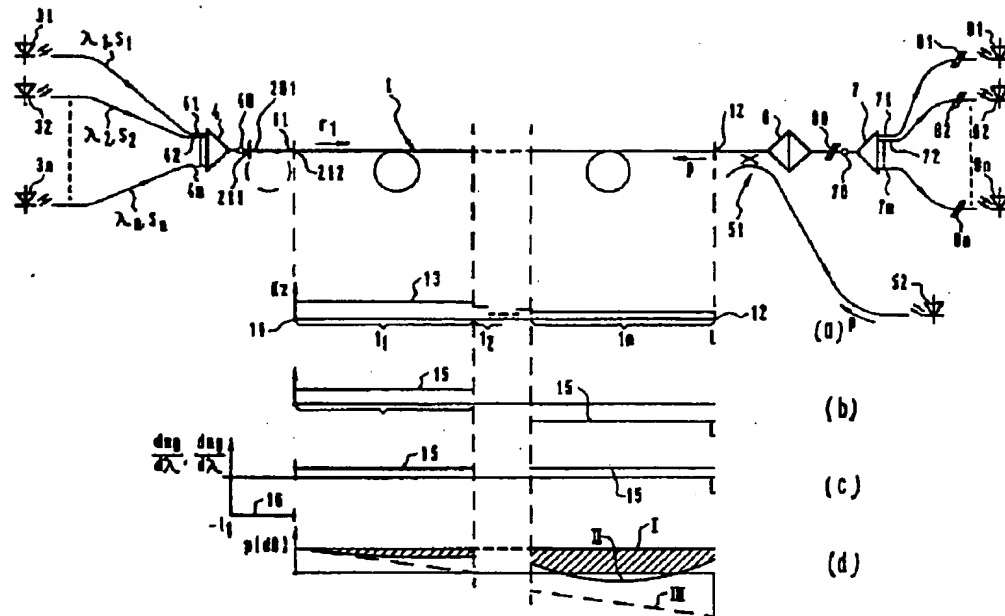
【図2】光伝送装置の異なる実施例の回路図及び線図。

【図3】光伝送装置の更に異なる実施例の回路図及び線図。

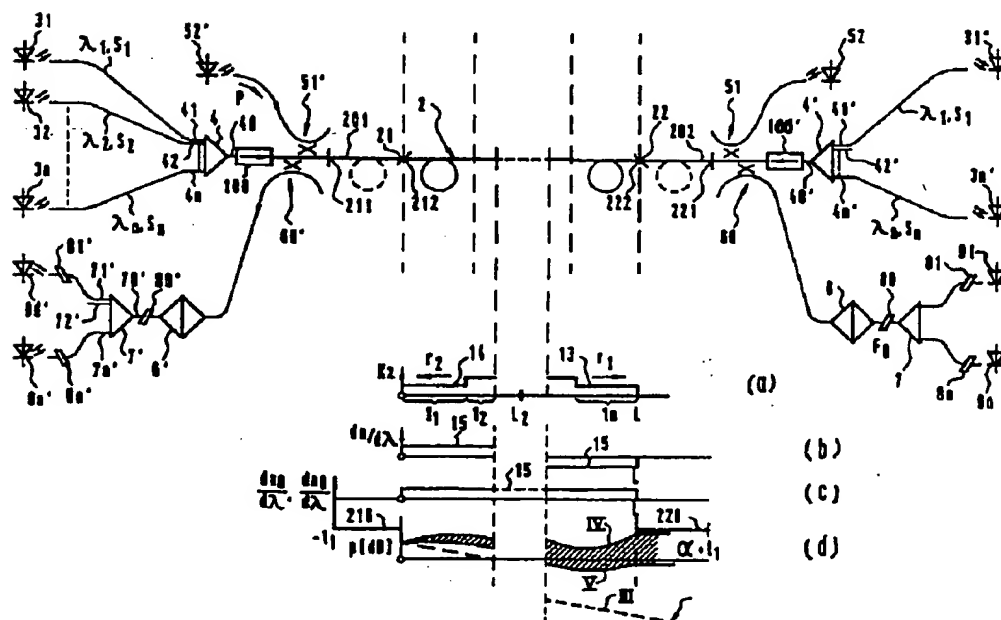
【符号の説明】

- 1、2 伝送導波路
- 201、202 補償導波路
- k_z ドーパント濃度
- P ポンピング光線
- r_1 、 r_2 伝送方向
- $S_1 \sim S_n$ 光信号
- $\lambda_1 \sim \lambda_n$ 光搬送波長

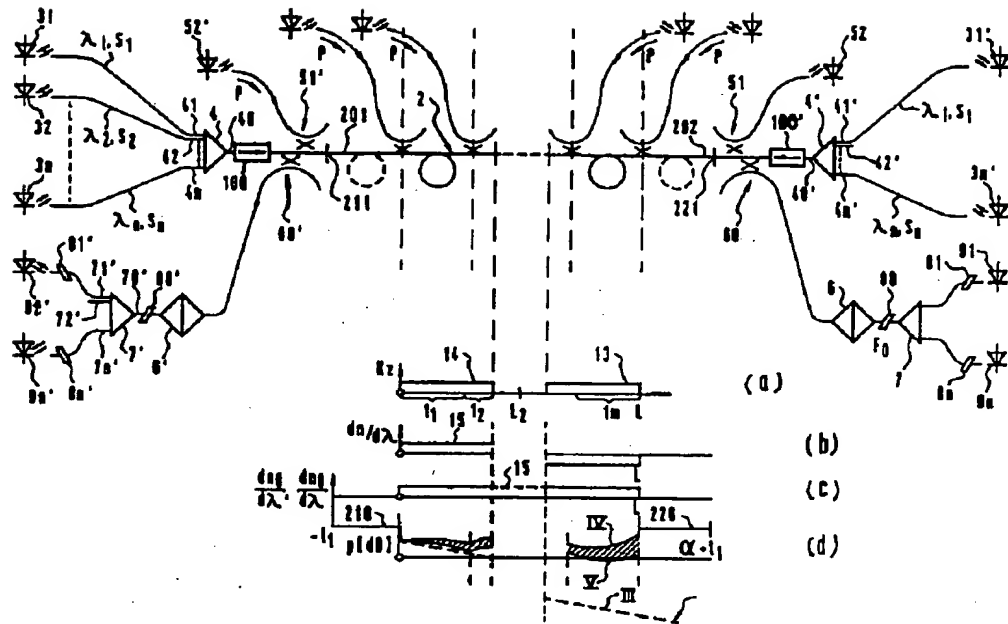
【図1】



【図2】



【図3】



フロントページの続き

(51) Int. Cl. ⁵
H 0 4 B 10/00

識別記号

庁内整理番号

F I

技術表示箇所